

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладобудування**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані  
технології та системи точної механіки»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології»**

**на тему: «Витратомір»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ПМ-61

Мельник Анастасія Миколаївна \_\_\_\_\_

Керівник:

к.т.н., доц.

Писарець Анна Валеріївна \_\_\_\_\_

Консультант з технологічного розділу:

професор д.т.н.

Антонюк Віктор Степанович \_\_\_\_\_

Рецензент:

к.т.н., доц.

Шевченко Вадим Володимирович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студентка \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

# ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

[illegible]

|           |               |       |      |                                 |  |        |
|-----------|---------------|-------|------|---------------------------------|--|--------|
|           |               |       |      | ДП ПМ61 11.000.00               |  |        |
|           | ПІБ           | Підп. | Дата | Відомість<br>дипломного проекту | Лист   | Листів |
| Розробн.  | Мкльник А.М.  |       |      |                                 | 1  | 1      |
| Керівн.   | Писатець А.В. |       |      |                                 | КПІ ім. Ігоря<br>Сікорського<br>Каф. ПБ<br>Гр. ПМ-61 |        |
| Консульт. |               |       |      |                                 |  |        |
| Н/контр.  |               |       |      |                                 |  |        |
| Зав.каф.  |               |       |      |                                 |  |        |

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту  
на тему: «Витратомір»**

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладобудування**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи точної механіки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Мельник Анастасії Миколаївній**

1. Тема проєкту «Витратомір», керівник проєкту Писарець Анна Валеріївна, к.т.н., доц., затверджені наказом по університету від «25» \_\_ травня \_\_ 2020 р. № 1180-с

2. Термін подання студентом проєкту \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проєкту 3.1 Вимірюване середовище – вода. 3.2 Номінальний діаметр  $D_n=40 \cdot 10^{-3}$  м. 3.3 Діапазон вимірюваних витрат,  $\text{м}^3/\text{год}$ :  $Q_{\min} - 1.1$ ;  $Q_{\max} - 35.9$ . 3.4 Перепад тиску при  $Q_n$  – не більше 40 кПа. 3.5 Максимальний робочий тиск вимірюваного середовища – 9,93 МПа. 3.6 Температура вимірюваного середовища,  $^{\circ}\text{C}$ :  $-40 \div +232$ . 3.7 Температура навколишнього середовища,  $^{\circ}\text{C}$ :  $-20 \div +85$ . 3.8 Допустима відносна похибка, % – 0,65. 3.9 Ступінь захисту IP66.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) Огляд і аналіз існуючих витратомірів. Розробка схеми вимірювання. Розробка математичної моделі витратоміра. Розрахунки конструктивних елементів приладу. Розрахунки метрологічних характеристик витратоміра. Розробка конструкції приладу.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 5.1. Принципова схема витратоміра, 1 арк. ф. А2. 5.2. Витратомір. 3-D модель, 1 арк. ф. А2. 5.3. Витратомір. Складальний кресленик, 1 арк. ф. А1. 5.4. Робочі креслення деталей, 1 арк. ф. А1. 5.5. Графічні матеріали, 1 арк. ф. А1.

6. Консультанти розділів проекту\*

| Розділ        | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---------------|---|----------------|------------------|
|               |   | завдання видав | завдання прийняв |
| Технологічний | Антонюк В.С.                              |                |                  |

7. Дата видачі завдання 30 квітня 2020 р.

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проєкту   | Термін виконання етапів проєкту | Примітка |
|-------|---|---------------------------------|----------|
| 1.    | Одержати у керівника дипломного проєкту (ДП) затвердженого завідувачем кафедри завдання на ДП                           | 30 квітня 2020 р.               |          |
| 2.    | Виконання пояснювальної записки ДП  | 05 червня 2020 р.               |          |
| 3.    | Виконання технологічного розділу ДП, передача на перевірку та одержання підпису консультанта                            | 05 червня 2020 р.               |          |
| 4.    | Виконання графічних матеріалів ДП   | 05 червня 2020 р.               |          |
| 5.    | Подання керівнику для перевірки: ДП та тексту його остаточного варіанту в електронному вигляді, одержання відгуку на ДП | 08 червня 2020 р.               |          |
| 6.    | Одержання рецензії на ДП  | 09 червня 2020 р.               |          |
| 7.    | Подання ДП на кафедру, одержання грифу «До захисту допущено» у завідувача кафедри                                       | 09 червня 2020 р.               |          |
| 8.    | Подання ДП, відгуку та рецензії в екзаменаційну комісію університету  | 15 червня 2020 р.               |          |
| 9.    | Захист дипломного проєкту в екзаменаційній комісії університету   | 16 червня 2020 р.               |          |
| 10.   | Подання повної електронної версії ДП на кафедру для розміщенню в ELAKPI   | 17 червня 2020 р.               |          |

Студент

Анастасія МЕЛЬНИК

Керівник

Анна ПИСАРЕЦЬ

---

\* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

## Реферат

Дипломний проект складається з вступу, двох розділів, переліку посилань і додатків. Загальний об'єм складає 52 сторінки, 5 таблиць, 22 рисунки.

Метою роботи є створення витратоміра, оцінка його метрологічних характеристик, розрахунок конструктивних і технологічних параметрів.

Для досягнення мети проаналізовано методи вимірювання витрати, що набули найбільшого поширення у вимірювальній практиці, їх недоліки і переваги; розроблено схему вимірювання витрати; оцінено метрологічні характеристики вимірювача; у інтегрованій системі автоматизованого проектування SolidWorks створено тривимірну модель витратоміра.

У технологічному розділі була описана конструкція приладу, розраховані критерії технологічності приладу та розмірний ланцюг, побудовані схема складального складу та технологічна схема складання.

Ключові слова: витрата, вихровий витратомір, тіло обтікання, вихорі.

## **Abstract**

The diploma project consists of an introduction, two sections, a list of references and appendices. The total volume is 52 pages, 5 tables, 22 figures.

The purpose of the work is to create a flow meter, assess its metrological characteristics, calculation of design and technological parameters.

To achieve this goal, the methods of measuring the costs that have become the most common in measurement practice, their disadvantages and advantages are analyzed; the scheme of measurement of a expense is developed; metrological characteristics of the meter are estimated; a three-dimensional flowmeter model has been created in the integrated SolidWorks computer-aided design system.

In the technological section the design of the device was described, the criteria of manufacturability of the device and the dimensional chain were calculated, the scheme of assembly structure and the technological scheme of assembly were constructed.

Key words: flow rate, vortex flow meter, flow body, vortices.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....                                     | 10 |
| ВСТУП .....   | 11 |
| ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ .....                      | 12 |
| 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВИТРАТОМІРІВ .....               | 12 |
| 1.1. Ультразвукові витратоміри .....                        | 12 |
| 1.2. Електромагнітні витратоміри .....                      | 14 |
| 1.3. Вихрові витратоміри .....                              | 15 |
| 1.4. Порівняльний аналіз методів вимірювання витрат.....    | 16 |
| 1.5. Особливості роботи вихрових витратомірів .....         | 18 |
| 2. РОЗРОБКА СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ .....                         | 23 |
| 2.1. Тіло обтікання .....                                   | 23 |
| 2.2. Перетворювачі вихрових коливань .....                  | 24 |
| 2.3. Схема вимірювання .....                                | 26 |
| 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИТРАТОМІРА .....           | 28 |
| 4. РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИТРАТОМІРА ..... | 31 |
| 4.1. Статична характеристика .....                          | 31 |
| 4.2. Похибка вимірювання .....                              | 34 |
| 4.3. Втрата тиску .....                                     | 35 |
| ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....                                   | 40 |
| 1. ОПИС ПРИЛАДУ.....  | 40 |
| 2. ПОБУДОВА СХЕМИ СКЛАДАЛЬНОГО СКЛАДУ.....                  | 41 |
| 3. ПОБУДОВА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ СКЛАДАННЯ.....              | 42 |
| 4. ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ПРИЛАДУ.....                      | 43 |

|           |      |               |        |      |                                    |  |  |            |      |         |  |
|-----------|------|---------------|--------|------|------------------------------------|--|--|------------|------|---------|--|
|           |      |               |        |      | ДП ПМ6111.000.00                   |  |  |            |      |         |  |
|           |      |               |        |      |                                    |  |  |            |      |         |  |
| Змн.      | Арк. | № докум.      | Підпис | Дата |                                    |  |  |            |      |         |  |
| Розроб.   |      | Мельник А.М.  |        |      | Витратомір<br>Пояснювальна записка |  |  | Літ.       | Арк. | Акрушів |  |
| Перевір.  |      | Писарець А.В. |        |      |                                    |  |  |            |      | 8       |  |
|           |      |               |        |      |                                    |  |  | ПБФ, ПМ-61 |      |         |  |
| Н. Контр. |      |               |        |      |                                    |  |  |            |      |         |  |
| Затверд.  |      | Писарець А.В. |        |      |                                    |  |  |            |      |         |  |



|    |   |    |
|----|---|----|
| 5. | РОЗРАХУНОК РОЗМІРНОГО ЛАНЦЮГА.....                        | 48 |
| 6. | РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ<br>ПРИЛАДУ..... | 51 |
|    | ВИСНОВКИ.....   | 53 |
|    | ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....                                    | 54 |
|    | ДОДАТКИ .....   | 57 |

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ61111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 9    |

## ПЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ТО – тіло обтікання,

ППВК – приймачі-перетворювачі вихрових коливань,

ВП – вимірювальний перетворювач.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ДП ПМ6111.000.00</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

## ВСТУП

В сучасному світі досить важливим є контроль споживання ресурсів, які використовує людство, таких як: газ, вода, електроенергія та інші. Однією з глобальних проблем є дефіцит питної води, тому її ціна постійно зростає і збільшується потреба в точному вимірюванні об'ємної витрати.

Існує велика різноманітність методів вимірювання витрати рідини. Деякі з них отримали промислову реалізацію, інші – лабораторне застосування.

Важливими характеристиками приладів обліку є точність вимірювання, широкий діапазон вимірювання, лінійність статичної характеристики, мінімальний вплив перетворювача витрати на вимірюване середовище, незалежність результатів вимірювання від параметрів вимірюваного середовища, надійність, чутливість до малих витрат, технологічність конструкції, простота експлуатації та сервісного обслуговування, що забезпечують якість обліку.

Метою роботи є дослідження функціональних можливостей витратомірів, що передбачає розв'язання наступних задач:

- огляд і аналіз існуючих витратомірів,
- розробку схеми вимірювання,
- створення математичної моделі роботи приладу,
- розрахунок метрологічних характеристик витратоміра.

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 11   |

## ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВИТРАТОМІРІВ

Вибір конкретного приладу для вимірювання кількості/витрати води починається з вибору методу вимірювання, що є складною багатокритеріальною задачею [1].

Поширеного застосування у практиці вимірювання витрати і кількості рідин отримали тахометричний, ультразвуковий, електромагнітний і вихровий методи [1 – 9]. Найбільш сучасними і перспективними є методи, якими здійснюється вимірювання за відсутності рухомих елементів у гідравлічній частині приладу.

#### 1.1. Ультразвукові витратоміри

Принцип дії ультразвукових витратомірів базується на використанні ефекту зсуву ультразвукових коливань потоком контрольованого середовища [2, 10].

Ультразвукові витратоміри поділяються на витратоміри, що базуються на переміщенні акустичних коливань, які рухаються через потік, і витратоміри, побудовані на ефекті Допплера. Найбільшого поширення набули прилади, принцип дії яких ґрунтується на вимірюванні різниці часів проходження ультразвуку за напрямом потоку та проти нього. Рідше зустрічаються витратоміри, в яких акустичні хвилі спрямовані перпендикулярно до потоку і вимірюється відхилення хвиль від заданого напрямку. Прилади на ефекті Допплера використовуються для вимірювання місцевої швидкості потоку [2, 3, 10].

Для введення акустичних коливань в потік і для прийому їх на виході з нього необхідні випромінювачі і приймачі коливань – головні елементи первинного перетворювача ультразвукового витратоміра. При стисненні і

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 12   |

розтягуванні в заданих напрямках деяких п'єзоелементів на їх поверхні з'являються електричні заряди, і навпаки, якщо до цих поверхонь прикласти різницю електричних потенціалів, то п'єзоелемент стиснеться або розтягнеться, залежно від того, на якій поверхні буде більша напруга – зворотній п'єзоефект. На останньому ґрунтується робота випромінювачів, які перетворюють змінну електричну напругу в акустичні коливання тієї ж частоти. На прямому п'єзоефекти працюють приймачі, які перетворюють акустичні коливання в змінну електричну напругу [10].

П'єзоелементи 2, 3 у корпусі 1 можна розташувати під кутом  $\theta$  до напрямку потоку (рис. 1.1).

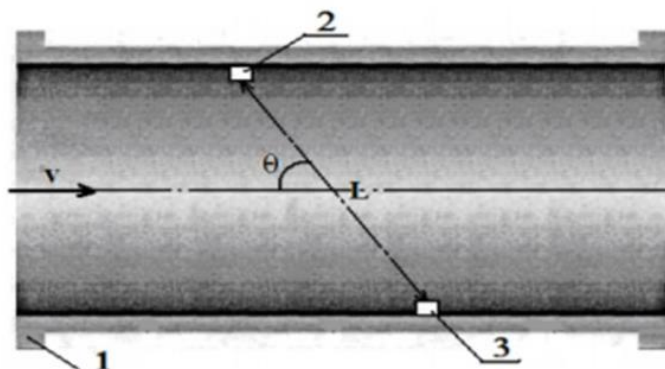


Рисунок 1.1 - Схема витратоміра з двома п'єзоелементами

Переваги ультразвукових витратомірів окреслюються [1, 2, 3, 10]:

- простотою конструкції первинного перетворювача;
- високою точністю вимірювання в широкому динамічному діапазоні;
- відсутністю рухомих частин та гідравлічного опору;
- низьким енергоспоживанням;
- можливістю вимірювання витрати рідини у широкому діапазоні номінальних діаметрів трубопроводів (15...1600 мм);
- можливістю монтажу п'єзоперетворювачів у наявному трубопроводі з подальшими налаштуванням і випробуванням імітаційним методом, у тому числі на місці експлуатації, що особливо важливо при великих

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 13   |

діаметрах трубопроводу.

Серед недоліків таких приладів слід відмітити складність вимірювальних схем, залежність показань від тиску і температури вимірюваного середовища.

## 1.2. Електромагнітні витратоміри

Принцип дії електромагнітних витратомірів базується на тому, що при протіканні рідини у магнітному полі в ній виникає електричне поле, потенціал якого пропорційний швидкості потоку. В частину трубопроводу, виготовленого із немагнітного матеріалу, покритого всередині неелектропровідною ізоляцією і розміщеного між полюсами магніту, вводяться два електроди перпендикулярно до напрямку руху рідини та до силових ліній магнітного поля (рис. 1.2) [10].

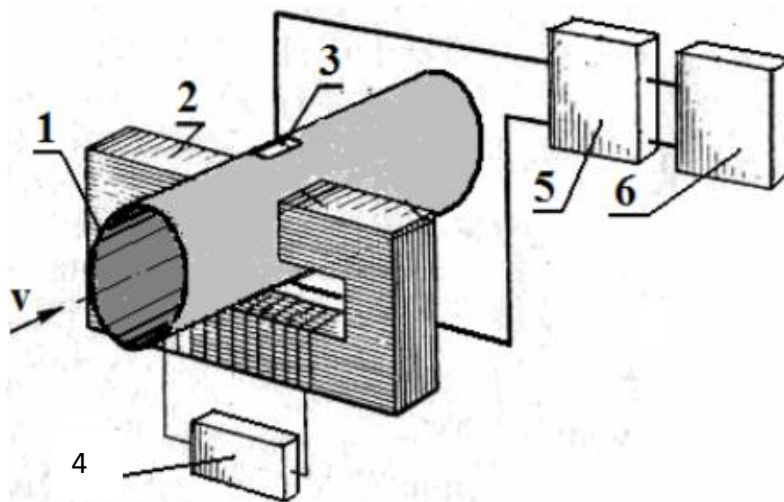


Рисунок 1.2 - Схема електромагнітного витратоміра: 1 – трубопровід, 2 – магніт, 3 – електрод, 4 – джерело живлення, 5 – вторинний перетворювач, 6 – відліковий пристрій

Перевагами електромагнітних витратомірів є [1 – 3, 10]:

- незалежність показань від в'язкості і густини вимірюваної речовини;

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 14   |

- незалежність сигналу від характеру потоку рідини;
- відсутність втрат тиску;
- легкість пристосування для проходження потоків змінного напрямку; лінійність шкали;
- відсутність рухомих вимірювальних елементів та вимірювальних елементів, що виступають в потік;
- можливість застосування в трубопроводах будь-якого діаметра;
- можливість вимірювання витрат в широкому діапазоні;
- необхідність у менших довжинах прямих ділянок трубопроводу при встановленні, ніж у приладів інших класів;
- висока швидкодія; можливість вимірювання агресивних, абразивних, забруднених і в'язких рідин;
- можливість імітаційної повірки.

Перетворювачі витрат великих калібрів громіздкі і дорогі, тому застосування їх не завжди економічно доцільне.

## 1.2. Вихрові витратоміри

Принцип дії вихрових витратомірів базується на використанні вихрових коливань, створюваних вимірюваним потоком. Застосування цього явища дозволяє вимірити значення витрати, використовуючи природні фізичні властивості досліджуваного потоку, без внесення в потік рухомих чутливих елементів. Це дає можливість створити прилад гранично простим і надійним. Крім того, вихрові коливання мають місце не тільки в потоках рідини, але і газу, тому такі прилади можуть бути застосовані в однаковому конструктивному виконанні як для рідини, так і для газів [2, 3, 10 – 12].

Вихрові витратоміри поділяються на витратоміри з тілом обтікання, з процесією воронкоподібного вихору та з осцилюючим струменем.

Основними перевагами вихрового методу вимірювання є [2, 3, 10, 12,13]:

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                  | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  |      |

- відсутність частин, які обертаються;
- простота і надійність перетворювача витрати;
- незалежність показань від тиску і температури;
- широкий діапазон вимірювання;
- лінійність шкали;
- достатня точність у широкому діапазоні;
- частотний вимірювальний сигнал;
- стабільність показань;
- можливість одержання універсального градуювання;
- можливість створення імітаційних методів і засобів перевірки;
- можливість створення лічильників пари і газу;
- прийнятна ціна.

Недоліками таких приладів є [2, 3, 10, 12]: чутливість до вібрацій та зміни температури, непридатність для вимірювання за малих швидкостей потоку.

#### 1.4 Порівняльний аналіз методів вимірювання витрат

Аналіз вимог, що висуваються до сучасних приладів обліку, та метрологічних характеристик витратомірів [14 – 17] дозволяє порівняти вимірювальні прилади, що базуються на різних методах вимірювання.

Прилад буде тим краще, чим більше його діапазон вимірювання, менше похибка та вище стабільність характеристик. Стабільність характеристик будемо оцінювати за тривалістю міжповірного інтервалу. Чим більше тривалість міжповірного інтервалу для даного типу приладу, тим більша надійність в роботі йому притаманна, тим довше зберігаються незмінними його характеристики, тим вище стабільність показань приладу.

Важливим параметром витратоміра є також реакція на зміну фізичних властивостей вимірюваного середовища. Основними параметрами

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 16   |



вимірюваного середовища, що впливають на роботу досліджуваних приладів, є електропровідність, густина, температура та в'язкість.

Отже, в якості критеріїв порівняння оберемо такі параметри витратомірів (табл. 1.1):

- межі вимірювання,
- динамічний діапазон,
- відносну похибку,
- сталу часу,
- перепад тисків,
- вплив параметрів вимірюваного середовища,
- міжповрочний інтервал,
- складність конструкції,
- довжину прямолінійних ділянок в місці встановлення.

Таблиця 1.1- Технічні характеристики приладів, що базуються на різних методах вимірювання витрати

| Параметри приладів                   |                    | Класи приладів   |   |  |  |
|--------------------------------------|--------------------|--|---|--|--|
|                                      |                    | Турбінні   | Вихрові   | Електромагнітні  | Ультразвукові  |
| Межі вимірювання м <sup>3</sup> /год |                    | 0.3 – 70   | 1.0 – 25.0  | 0.18 – 72.0  | 0.7– 70.0  |
| Діапазон вимірювання                 |                    | 1:25 ÷ 1:100   | 1:25  | 1:25 ÷ 1:400   | 1:100  |
| Відносна похибка, %                  |                    | $\pm 4 Q_{\min} \div Q_n$<br>$\pm 1,5 Q_n \div Q_{\max}$ | $\pm 1.5$   | $\pm 5 Q_{\min} \div Q_n$<br>$\pm 2 Q_n \div Q_{\max}$ | $\pm 3 Q_{\min} \div Q_n$<br>$\pm 2 Q_n \div Q_{\max}$ |
| Стала часу, с                        |                    | 0,001 ÷ 0,01   | 0,01 ÷ 0,1  | 0,1  | 0,1  |
| Перепад тиску, кПа                   |                    | 50   | 30  | —  | 0,7  |
| Вплив параметрів                     | Електропровідність | 0*   | 0   | 1  | 0  |
|                                      | Температура        | 0  | 0   | 0  | 0  |
|                                      | Густина            | 1  | 0   | 0  | 1  |
|                                      | Режим руху         | 0  | 1   | 0  | 1  |
|                                      | В'язкість          | 1  | 1   | 0  | 1  |
| Міжповірочний інтервал, років        |                    | 4  | 4   | 4  | 4  |
| Складність конструкції               |                    | конструкція середньої складності                         | Проста конструкція ВП, складність електронної частини |  |  |
| Прямі ділянки до/після               |                    | 3DN/1DN  | 10DN/2DN  | 2DN/2DN  | 3DN/2DN  |
| Повірка                              |                    | проливна   | імітаційна, проливна                                  | імітаційна, проливна                                   | імітаційна, проливна                                   |
| Вартість                             |                    | низька   | низька  | середня  | висока   |

\*Примітка: якщо параметр рідини істотно впливає на роботу приладу та необхідні спеціальні заходи в конструкції або вимірювальній схемі для зниження цього впливу, то позначимо цей вплив 1, у протилежному випадку 0.

Порівнюючи зазначені характеристики приладів (табл. 1.1), можна зробити такі висновки [14 – 17]:

- найточнішими є вихрові витратоміри, прилади інших типів за точністю не поступаються один одному;
- тривалість міжповірного інтервалу в Україні для розглянутих приладів різних типів однакова;
- найдовші прямі ділянки до приладу необхідні при встановленні вихрових та ультразвукових витратомірів; для приладів інших типів їх довжина майже однакова;
- найбільшому впливу параметрів вимірюваного середовища підлягають ультразвукові витратоміри, оскільки на їх роботу впливають густина, в'язкість та режим руху вимірюваного потоку;
- робота вихрових витратомірів залежить від режиму руху та в'язкості потоку, турбінних – від густини та в'язкості потоку вимірюваного середовища;
- найменшому впливу з боку параметрів вимірюваного потоку підлягають електромагнітні витратоміри, оскільки на їх роботу впливає тільки електропровідність вимірюваного середовища; але саме це явище не дозволяє застосовувати їх для широкого спектру рідин;
- найбільш повно вимогам до сучасних вимірювальних приладів відповідають вихрові витратоміри.

Для подальших досліджень обираємо вихровий метод вимірювання через його переваги над іншими.

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 18   |

## 1.5. Особливості роботи вихрових витратомірів

Вихрові витратоміри розділяються на три групи, істотно відмінні одна від одної [2, 3, 10].

### 1. Витратоміри з процесією воронкоподібного вихору

У первинному перетворювачі потік закручується і, потрапляючи потім у розширену частину корпусу, прецесує, створюючи при цьому пульсації тиску (рис. 1.3).

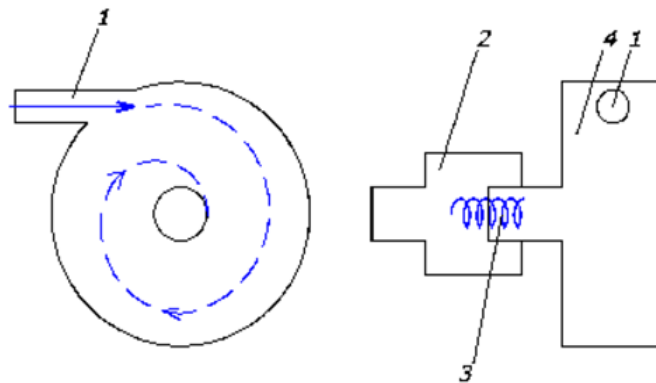


Рисунок 1.3 - Вихровий витратомір з завихрювальним пристроєм у вигляді циліндричної камери з тангенціальним підведенням потоку:

1 – труба вхідного потоку, 2 – камера великого діаметру, 3 – патрубок,  
4 – циліндрична камера

Процес виникнення прецесії ядра вихору можна пояснити так: вісь ядра вихору, навколо якої останній обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ , може під впливом місцевої зміни тиску або швидкості відхилитись від вісі Oz патрубка на кут  $\varphi$  (рис. 1.4). При цьому виникне різниця тисків між внутрішньою та зовнішньою поверхнями ядра, оскільки на зовнішній поверхні частоти обертання як ядра, так і всього потоку, діють в одному напрямку, а на внутрішній поверхні – в протилежних напрямках один до одного [10].

Ця різниця тисків створює силу  $P_n$ , перпендикулярно до осі ОЕ, прикладену на відстані  $l$  від точки О і створює відносно цієї точки головний

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 19   |

момент внутрішніх сил  $M$ . Швидкість  $v$ , яка перпендикулярна до площини  $zOE$ , викличе обертання вісі ядра вихору  $OE$  навколо нерухомої осі  $Oz$  з кутовою швидкістю  $\omega_1$  [10].

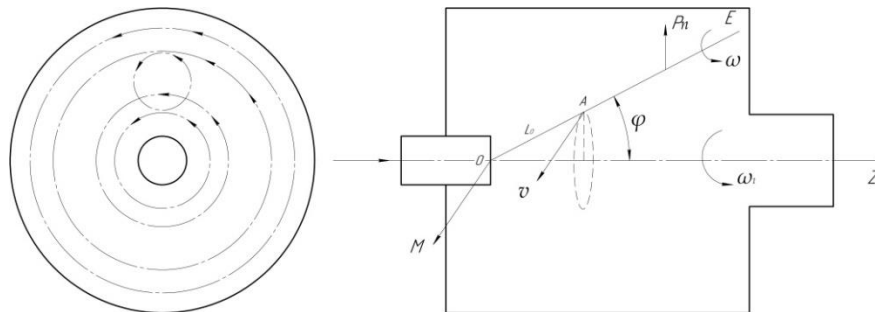


Рисунок 1.4 - Схема утворення прецесії ядра вихору

2. Витратоміри, у первинному перетворювачі яких знаходиться нерухоме тіло

Тіло, що знаходиться на шляху потоку, змінює напрям руху струменів, які його обтікають, і збільшує їх швидкість. За тілом обтікання створюється знижений тиск [10]. Поверхневий шар, який обтікає тіло, відривається від тіла і під впливом зниженого тиску з обох його боків по чергово виникають зривисті вихори, що створюють пульсації тиску (рис. 1.5).

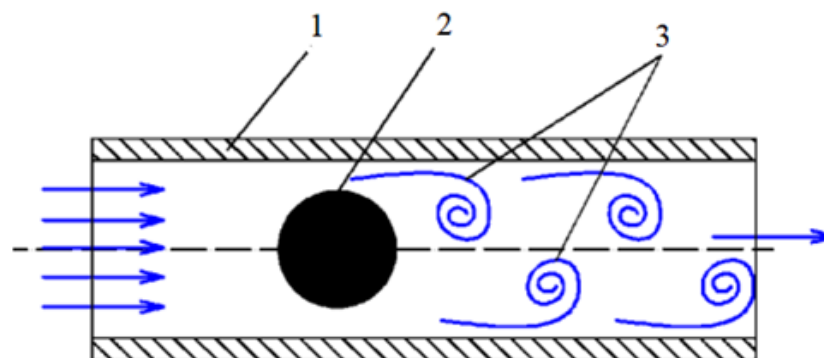


Рисунок 1.5 - Вихровий витратомір з тілом обтікання: 1 – трубопровід/корпус; 2 – тіло обтікання; 3 – вихорі; стрілками показаний напрям руху потоку

### 3. Витратоміри з струменем, що осцилює [10].

У первинному перетворювачі таких перетворювачів струмінь, що витікає з отвору, здійснює автоколивання, створюючи при цьому пульсації тиску (рис. 1.6) [10].

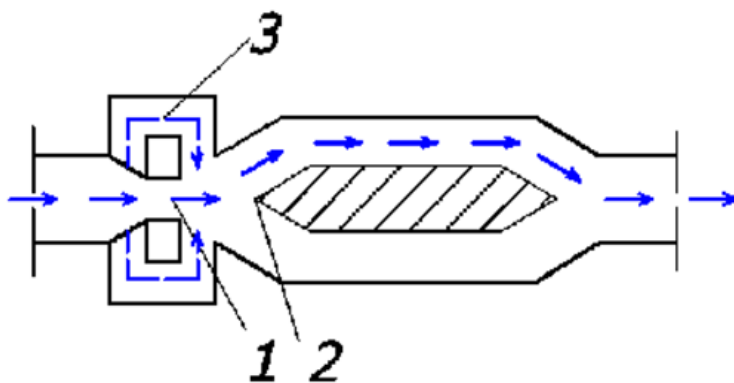


Рисунок 1.6 - Вихровий витратомір із осцилюючим струменем: 1 – сопло, 2 – дифузор, 3 – обвідна трубка

Вихровий витратомір із зворотнім гідравлічним зв'язком забезпечує більш стійкий процес осциляції (рис. 1.7). Зберігається лінійна залежність між витратою та частотою коливань у широкому діапазоні чисел  $Re$  [10].

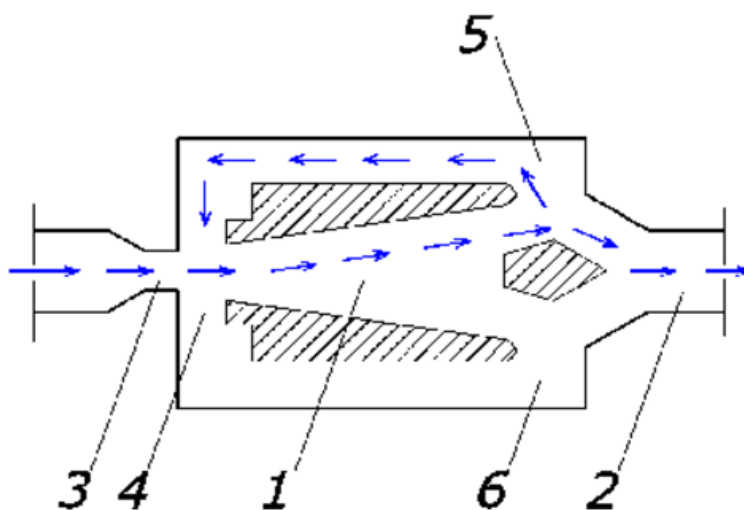


Рисунок 1.7 - Вихровий витратомір із зворотнім гідравлічним зв'язком:  
1 – сопло, 2 – сопло, 3 – дифузор, 4 – нижній обвідний канал, 5 – патрубок,  
6 – верхній обвідний канал

Витратоміри кожної групи працюють в різних галузях і переважно різних діапазонах витрат, що обумовлено їх конструктивним виконанням.

Витратомірам з тілом обтікання притаманна мала металоємність, тому їх легко монтувати в трубопроводи великих діаметрів. Однак слід враховувати, що частота вихроутворення визначається швидкістю потоку в місті обтікання, тому зв'язок між цією частотою і значеннями витрати залежить від постійності епюри швидкостей по перетину потоку за час вимірювання.

Найбільшу стабільність характеристик та їх незалежність від властивостей вимірюваного середовища і способів установки приладу мають вихрові витратоміри з потоком, що обертається. Однак корпус приладу є частиною технологічного трубопроводу і монтується в нього за допомогою фланців чи штуцерів. Металоємність такого приладу суттєво вища за металоємність попереднього та залежить від його розміру. Прилади цієї групи не отримали широкого розповсюдження [12, 21].

Витратоміри зі струменем, що коливається, відрізняються високою складністю виготовлення і великою металоємністю, у зв'язку з чим знайшли застосування у вимірюванні малих витрат [12].

Серед розглянутих вихрових витратомірів найбільш повно відповідають умові одночасного виконання різних і найчастіше суперечливих вимог, що висуваються до приладів сучасним рівнем технологічних процесів, прилади з тілом обтікання.

Безсумнівною перевагою таких приладів є незначний вплив фізичних параметрів вимірюваного середовища на їхні метрологічні характеристики [13].

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 22   |

## 2. РОЗРОБКА СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ

Перетворення витрати в корисний сигнал у вихрових витратомірах відбувається в два етапи. Спочатку створюються пульсуючі або осцилюючі струмені, частота пульсацій тиску або швидкості яких пропорційна об'ємній вимірюваній витраті. На другому етапі ці пульсації перетворюються у вихідний, зазвичай електричний, сигнал. Пристрої для виконання останньої операції називають – приймачі-перетворювачі вихрових коливань (ППВК).

### 2.1. Тіло обтікання

Для формування регулярних вихорів у витратомірах застосовують ТО різної просторової форми [12, 18 – 20]: циліндри, призми, пластини, кулі тощо (рис. 1.8).

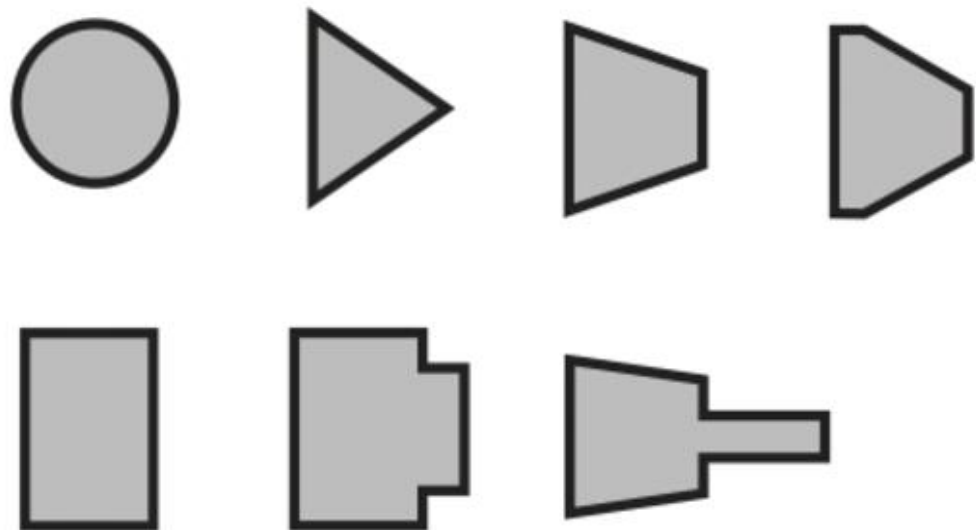


Рисунок 1.8 - Форми тіл обтікання

Для підвищення стабільності вихроутворення, зменшення лобового опору ТО і розширення області чисел Рейнольдса, у якій виникають регулярні вихорі, у ТО передбачається пристрій для відсмоктування пограничного шару рідини. Це щілини, отвори різної форми, які

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 23   |

розташовують паралельно твірній ТО (рис. 1.9). Такі канали виконують у процесі вихроутворення роль каналів зворотного зв'язку [12, 19, 20].

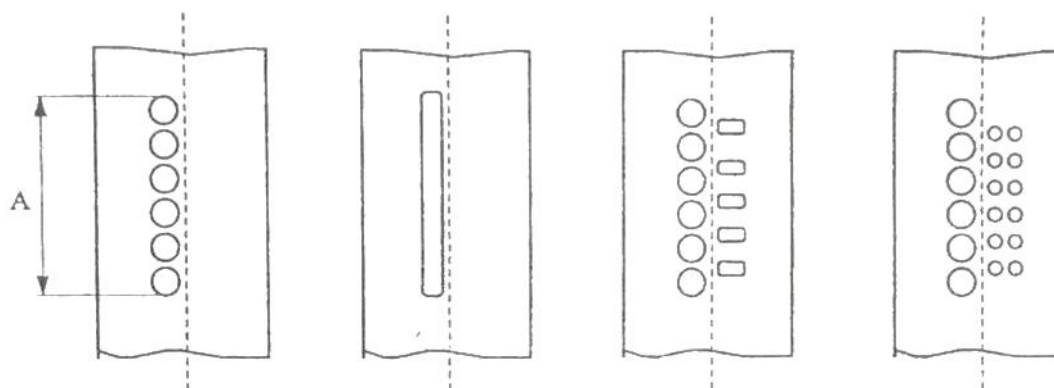


Рисунок 1.9 - отвори, які розташовують паралельно твірній ТО

При визначенні розмірів ТО необхідно враховувати, що його діаметр повинен складати не більш ніж 35 % від діаметру трубопроводу. Оптимальні значення знаходяться у діапазоні 20 – 25 %. У протилежному випадку зростають втрати тиску і змінюється картина вихроутворення [19].

## 2.2 Перетворювачі вихрових коливань

Сьогодні промисловістю випускаються вихрові лічильники, вихро-акустичні лічильники-витратоміри, ультразвукові вихрові лічильники, лічильники з вихровим електромагнітним перетворювачем, у яких використовуються мікропроцесори [21].

Різні виробники вихрових витратомірів використовують такі вторинні перетворювачі: ємнісний, індуктивний, ультразвуковий, інтегруючий і ін. [11].

ППВК поділяються на дві групи [20]:

- нерухомі,
- коливні з частотою вихорів.

До першої групи відносять [20]:

- термістори,



- термоанемометри,
- мембрани з тензометром,
- струминні елементи,
- ультразвукові перетворювачі,
- оптичні перетворювачі.

До другої групи відносяться [20]:

- коливний у вихровій доріжці елемент (кулька, пластина),
- саме тіло обтікання на гнучкій основі.

У витратомірах з процесією струменю і деяких моделях приладів з тілом обтікання в якості ППВК використовуються перетворювачі тиску у вигляді мембрани з тензометром. Як правило у витратомірах використовують п'єзоелектричні тензометри. Це пов'язано з тим, що в умовах коливання температур вимірюваного середовища, провідникові або напівпровідникові тензометри не можуть бути використаними. Найчастіше у перетворювачах тиску використовують п'єзоелектричну кераміку із цирконата титану або свинцю, яка може працювати в широкому діапазоні температур. Чутливість такого ППВК складає до 3 мВ/бар, тому в електричних схемах використовується п'єзоелектричний трансформатор, спеціальні мікросхеми, що ускладнює та підвищує вартість електричної схеми приладу [20].

Іноді перетворювачі тиску та термоанемометри об'єднуються в одній схемі з метою розширення діапазону вимірювання. У такому випадку електрична частина витратоміра ускладнюється ще більше [20].

Робота витратомірів з ультразвуковим зняттям вихрових коливань базується на тому, що умови проходження ультразвуку через вихрову формацію з рівномірною течією рідини відрізняються. За тілом обтікання в таких витратомірах установлені випромінювач і приймач ультразвукових коливань. При кожному проходженні вихору між ними змінюється параметр сигналу в приймачі. Може бути зареєстровано зміну фази сигналу, що приймається, або час проходження сигналу через вимірювальну ділянку трубопроводу, чи зміну амплітуди сигналу [20].

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                  | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  |      |

Оптичні перетворювачі в чистому вигляді, тобто ті, які базуються на проходженні світла через товщу води, використовуються рідко. Зазвичай такі прилади використовують за лабораторних умов для вивчення вихроутворення. Вони можуть використовуватись лише для чистих рідин, оскільки забруднення оптичних елементів неприпустимо. Але в поєднанні з іншими елементами, наприклад, с коливальними пластинами, струнами, їх використання має перспективи [20].

В багатьох випадках простоту, надійність і потужний вихідний сигнал можуть забезпечити ППВК з коливним елементом у вихровому потоці. Такі пластинки, струни, прапорці можуть бути поміщені як за тіло обтікання, так і всередині каналів зворотного зв'язку [20].

ППВК другої групи складаються із чутливого елемента – тіла, що безпосередньо сприймає впливи вихрової формації і електронної схеми, яка потрібна для перетворення коливного руху чутливого елемента в електричний сигнал. Залежно від виду вимірюваних коливань ППВК реагують на зміну тиску, швидкості, температури або інших характеристик вимірюваного середовища [20].

### 2.3. Схема вимірювання

Витратомір (рис. 1.10) складається із циліндричного тіла обтікання (ТО) 1, яке вмонтоване в корпус 2. Частота пульсацій що виникає при обтіканні тіла потоком, пропорційна об'ємній витраті і вимірюється вторинним перетворювачем 3.

Чутливим елементом вторинного перетворювача є два напівпровідникових термоанемометри, які включені в мостову схему і розмішені з обох боків тіла обтікання. Почергові вихроутворення викликають розбалансування моста, на виході якого формується вихідний сигнал. Вихідним сигналом є частота коливань опору.

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 26   |

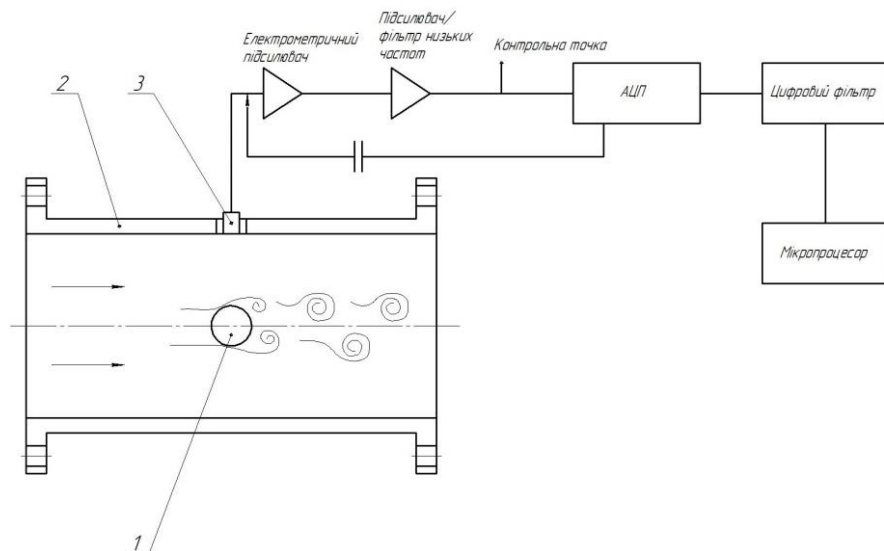


Рисунок 1.10. Принципова схема витратоміра: 1 – тіло обтікання, 2 – корпус, 3 – вторинний перетворювач

Далі перетворювачі швидкості та тиску перетворюють коливання, створені вихорами, в електричний сигнал, який потім підсилюється. Фільтр видаляє позасмугові та резонансні шуми і згладжує високочастотні [17, 19].

В контрольній точці є електричний сигнал вихорів його легко виміряти стандартними приладами.

Після цього сигнал перетворюється з аналогового в цифровий. Оцифрований сигнал проходить через ізольований в фільтр для обробки цифрових сигналів високих та низьких частот, після чого отримується інформація про частоту, яка передається в мікропроцесор системи. Він використовує цю інформацію для розрахунку точної вихрової частоти і витрати. Мікропроцесор регулює і контролює АЦП, процесор, імпульсний вихід, аналоговий вихід 4-20мА, протоколи HART і Fieldbus та дисплей [17].

### 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИТРАТОМІРА

Створення вихорів пов'язано з в'язкістю середовища. Зривисті вихори створюють позаду тіла обтікання двійний ланцюг вихорів. Теорія двійного ланцюгу вихорів – це ідеалізація вихрової доріжки, яка виникає позаду обтічних тіл [22]. Користуючись основними положеннями теорії [22] можна знайти швидкість вихору

$$u = \frac{\Gamma}{2\sqrt{2}l} = \frac{\pi r^2 \omega}{\sqrt{2}l} = \frac{\pi d v}{2\sqrt{2}l}, \quad (1.1)$$

$$\Gamma = \oint v dS = \oint \omega r \cdot r d\varphi = \omega r^2 \big|_0^{2\pi} = 2\pi r^2 \omega, \quad (1.2)$$

де  $\Gamma$  – циркуляція,

$\omega$  – кутова частота,

$v$  – швидкість потоку,

$l$  – відстань між вихорами,

$S$  – живий переріз вихору [19].

За значенням  $u$ , можна обрахувати коефіцієнт Струхаля. В системі координат, в якій тіло обтікання знаходиться, доріжка вихорів рухається зі швидкістю, по абсолютній величині рівній  $v - u$ . Коли доріжка зміститься на  $l$ , то вся картина руху вихорів повториться. Тому період буде дорівнювати

$$T = \frac{l}{v-u}, \quad (1.3)$$

звідси частота утворення вихорів відповідно до формули

$$f = \frac{v-u}{l} = \left(1 - \frac{u}{v}\right) \frac{d}{l} \cdot \frac{v}{d}, \quad (1.4)$$

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                  | 28   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  |      |

отже, коефіцієнт Струхаля дорівнюватиме [21]

$$Sh = \left(1 - \frac{u}{v}\right) \frac{d}{l}, \quad (1.5)$$

де  $d$  – характерний розмір тіла обтікання.

Основною особливістю вихроутворення при обтікання нерухомих тіл є те в процесі вихроутворення бере участь не весь потік, а тільки та його частина яка доторкається до тіла обтікання.

Якщо в перерізі трубопроводу  $S_1$  швидкість  $v_1$ , то поруч з тілом обтікання переріз  $S_2$  і швидкість  $v_2$  (рис. 1.11). Рівняння нерозривності потоку для цього випадку має вигляд

$$S_1 v_1 = S_2 v_2. \quad (1.6)$$

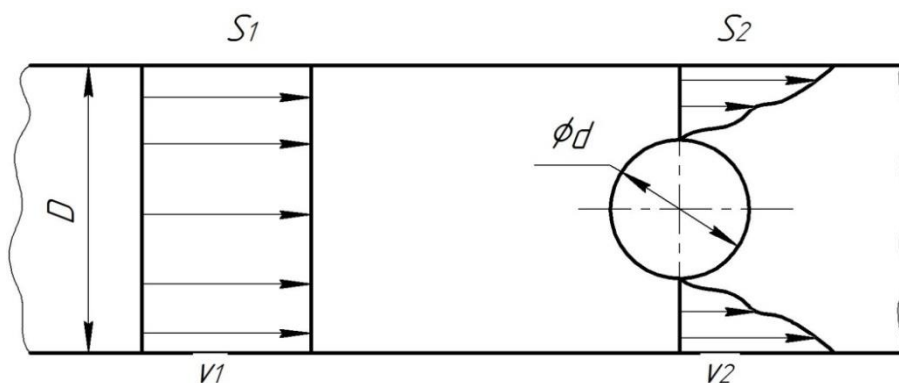


Рисунок 1.11 – Розподіл швидкостей при обтіканні циліндру:  $D$  – діаметр трубопроводу,  $d$  – діаметр тіла обтікання,  $v_1$  – швидкість в перерізі  $S_1$ ,  $v_2$  – швидкість в перерізі  $S_2$

Частота утворення вихорів пропорційна швидкості потоку біля ТО:

$$f = Sh \frac{v}{d}, \quad (1.7)$$

отже, при постійному розмірі  $d$  частота  $f$  пропорційна швидкості і об'ємній

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 29   |

витраті  $Q$ .

Залежність задається рівнянням

$$Q = (s \times d/Sh)f, \quad (1.8)$$

де  $s$  — площа найменшого поперечного перерізу потоку навколо ТО [19].

Співвідношення перерізів  $m$  тіла обтікання  $S_2$  і трубопроводу  $S_1$  визначається за формулою

$$m = 1 - \frac{2}{\pi} \left[ \frac{d}{D} \sqrt{1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2} + \sin^{-1} \frac{d}{D} \right], \quad (1.9)$$

а для значення  $\frac{d}{D} \leq 0,35$  рівняння (1.9) можна привести до виду

$$m = 1 - 1,25 \frac{d}{D}, \quad (1.10)$$

З урахуванням формул (1.8) і (1.10) для витрат можна записати [19]

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{Sh} \cdot \frac{d}{D} \left( 1 - 1,25 \frac{d}{D} \right) D^3 f. \quad (1.11)$$

Діапазон зміни витрати визначається двома умовами:

- верхня межа — максимальними числами Рейнольдса, при яких коефіцієнт Струхаля залишається постійним,
- нижня межа — мінімальними числами Рейнольдса, при яких коефіцієнт Струхаля залишається постійним [19].

#### 4. РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИТРАТОМІРА

Для вихрового витратоміра основними метрологічними характеристиками є статична характеристика, похибка вимірювання та втрата тиску.

Статична характеристика описує залежність вхідного сигналу від вихідного, у нашому випадку це залежність об'ємної витрати від частоти утворення вихорів. Похибка вимірювання – це відхилення, від істинного значення, результату вимірювання. Перепад тиску є критичним параметром для витратоміра і визначається як різниця тисків до встановленого ТО і після нього.

##### 4.1. Статична характеристика

Діапазон вимірювання вихрового витратоміра обмежується сталістю (незмінністю) числа  $Sh$  при зміні числа  $Re$ .

Для циліндричних тіл обтікання число  $Sh$  залишається сталим у діапазоні  $10^3 \div 10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$  [21].

Число Рейнольдса визначається за виразом

$$Re = \frac{\vartheta D}{\nu} = \frac{QD}{\nu S}, \quad (1.15)$$

де  $\vartheta$  – швидкість потоку,

$D$  – гідравлічний діаметр,

$\nu$  – кинематична вязкість вимірюваного середовища,

$S$  – площа перерізу трубопроводу.

Витрату речовини можна визначити за площею живого перерізу потоку

$$Q = \vartheta \cdot S. \quad (1.16)$$

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 31   |

Відповідно до (1.16) для швидкості можна записати

$$\vartheta = \frac{Q}{S}. \quad (1.17)$$

Гідравлічний радіус – геометрична характеристика живого перерізу для форми, що відрізняється від круглої, визначається за формулою

$$R_{\Gamma} = \frac{S}{x}, \quad (1.18)$$

де  $x$  – змочений периметр.

У випадку вихрового витратоміра маємо (рис. 1.12):

$$S = S_1 - S_2, \quad (1.19)$$

де  $S_1$  – площа поперечного перерізу за відсутності ТО,  $S_2$  – площа перерізу тіла обтікання.

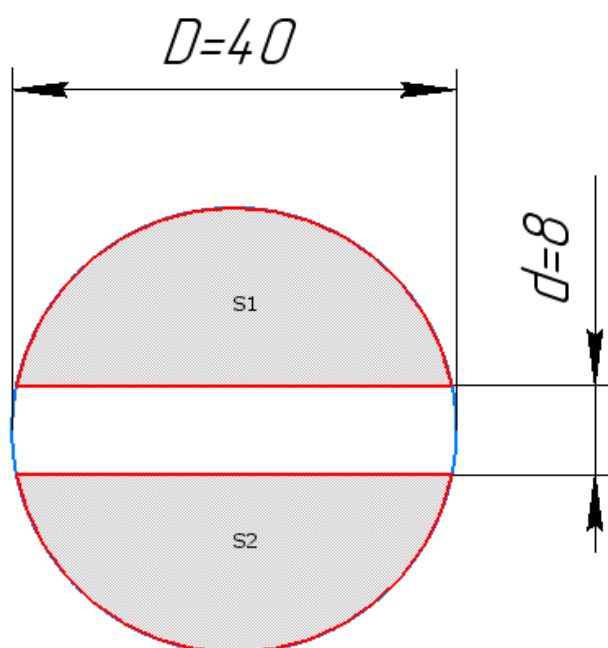


Рисунок 1.12 – Площа живого перерізу потоку у місці встановлення ТО



Для досліджуваного випадку отримуємо

$$S = \frac{\pi D^2}{4} - dD. \quad (1.20)$$

Змочений периметр визначаємо як суму усіх змочуваних довжин

$$x = \pi D + 2(D + d). \quad (1.21)$$

Враховуючи (1.20) і (1.21) для гідравлічного радіусу можна записати

$$R_{\Gamma} = \frac{\frac{\pi D^2}{4} - dD}{\pi D + 2(D + d)}. \quad (1.22)$$

Відповідно до (1.16) – (1.21) для числа Re отримуємо

$$Re = \frac{Q}{S} \cdot \frac{\frac{\pi D^2}{4} - dD}{(\pi D + 2(D + d)) \cdot \nu}. \quad (1.23)$$

Змінюючи витрату в діапазоні від 1,1 м<sup>3</sup>/год до 50 м<sup>3</sup>/год розраховуємо число Рейнольдса (рис. 1.13).

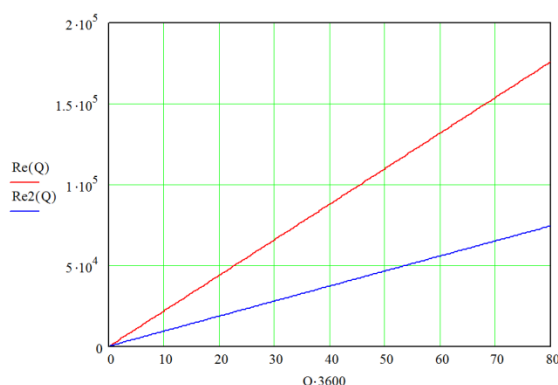


Рисунок 1.13 - Залежність числа Рейнольдса від витрати: червоний – для DN40; синій – з урахуванням встановлення ТО  $d=8 \cdot 10^{-3}$  м

У виявленому діапазоні зміни числа Re значення числа Sh становить 0.2 [21].

Статичну характеристику (рис. 1.14) визначаємо за виразом

$$f = \frac{4ShD}{\pi d \left(1 - 1,25 \frac{d}{D}\right) D^3} Q. \quad (1.24)$$

Вихідні дані для розрахунку:  $D=0.040$  м,  $d=0.008$  м,  $Sh=0.2$ ,  $Q$  від 1,1 до  $35.9$  м<sup>3</sup>/год.

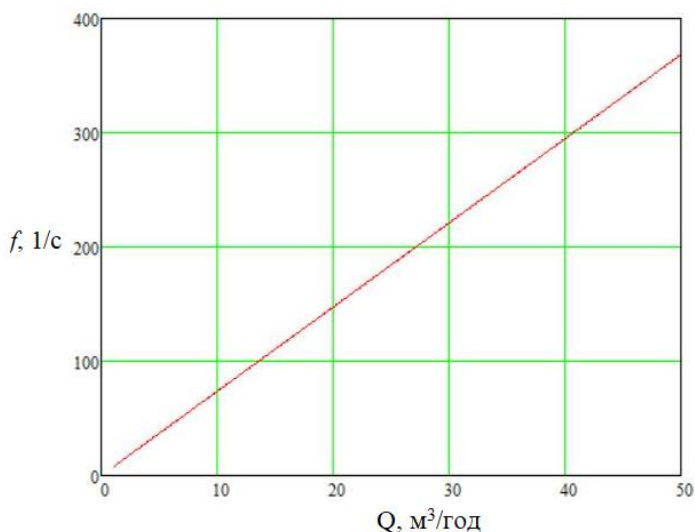


Рисунок 1.14 – Статична характеристика витратоміра

## 4.2. Похибка вимірювання

Розрахунок похибки проведемо диференціальним методом.

Відповідно до рівняння статичної характеристики (1.24) систематична складова похибки визначення частоти зриву вихорів має вигляд

$$\Delta f = \frac{df}{dQ} \Delta Q + \frac{df}{dD} \Delta D + \frac{df}{dd} \Delta d. \quad (1.25)$$

Після підстановки значень часткових похідних отримуємо

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 34   |

$$\Delta f = \frac{4Sh}{\pi d D^2 - 1,25 d^2 D} \Delta Q - \frac{4ShQ(2 \cdot 1,25 d^2 - \pi d D)}{(\pi d D^2 - 1,25 d^2 D)^2} \Delta D + \frac{4ShQ(2 \cdot 1,25 d D^2 - \pi D^2)}{(\pi d D^2 - 1,25 d^2 D)^2} \Delta d.$$

Відносну похибку визначаємо за виразом (рис. 1.15):

$$\Delta f = \frac{\Delta Q f}{Q} - \frac{(1,25 d^2 - 2 \pi d D) \Delta D f}{(\pi d D^2 - 1,25 d^2 D)} - \frac{(2 \cdot 1,25 d D - \pi D^2) \Delta d f}{(\pi d D^2 - 1,25 d^2 D)}. \quad (1.26)$$

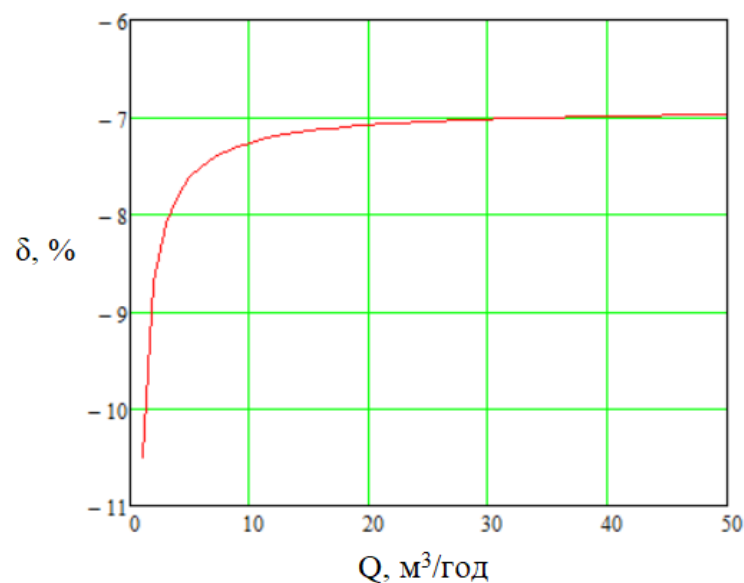


Рисунок 1.15 - Похибка вимірювання

### 4.3. Втрата тиску

Для визначення статичного тиску в певному перерізі перетворювача необхідно знати такі параметри (рис. 1.16):

- площу живого перерізу  $S_{zh}$ ;
- гідравлічний радіус в перерізі  $R_{\Gamma 1} = \frac{D}{4}$ ;
- середню швидкість  $v_{сер} = \frac{Q}{S_{zh}}$ ;
- режим руху турбулентний ;
- коефіцієнт місцевого опору  $\xi$ .

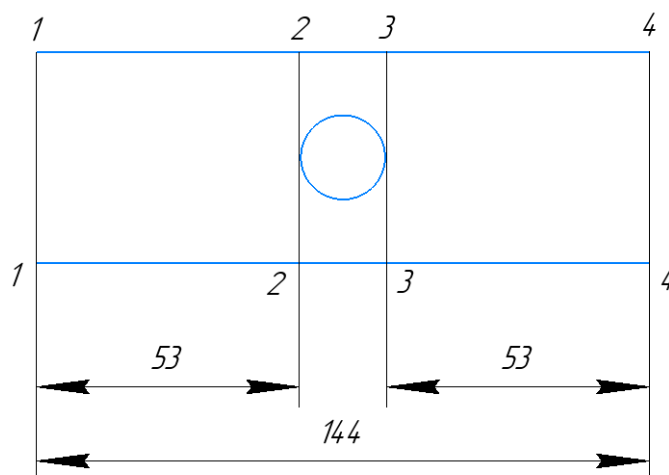


Рисунок 1.16 – Схема гідравлічного каналу перетворювача витратоміра.

1-1, 2-2, 3-3, 4-4 – характерні перерізи

Ділянка 1-2 – пряма ділянка постійного перерізу. Втрата тиску на ній визначається тільки втратами за довжиною між перерізами 1-1 і 2-2

$$P_2 = P_1 - h_l, \quad (1.27)$$

де  $h_l$  – втрати за довжиною.

Для визначення  $h_l$  застосовують залежність Дарсі-Вейсбака для круглих трубопроводів [24]:

$$h_l = \frac{\lambda_t}{4R_\Gamma} \cdot \frac{\vartheta_{cp}^2}{2g} l, \quad (1.28)$$

де  $\lambda_t$  – лінійний коефіцієнт опору тертя, залежний від режиму течії вимірюваного потоку,

$l$  – довжина ділянки.

Для розвинутого турбулентного потоку коефіцієнт опору тертя визначається за виразом

$$\lambda_t = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (1.29)$$

Ділянка 2-3 характеризується наявністю тіла обтікання у потоку. Для визначення тиску у перерізі 3-3 необхідно визначити коефіцієнт місцевого опору, породженого обтікання встановленого в потоці тіла.

Вираз для статичного тиску у перерізі 3-3 має вигляд:

$$P_3 = \frac{\rho_{\text{п}} v_{cp2}^2}{2} \left( 1 - \frac{S_{zh2}^2}{S_{zh3}^2} - \xi_{23} \frac{S_{zh2}^2}{S_{zh3}^2} \right) + P_2, \quad (1.30)$$

В загальному випадку для коефіцієнта місцевого опору при обтіканні тіла можна записати [23]:

$$\xi = k \frac{C_x S_M / S_{zh} (1 - \frac{2y}{D_0})^{3/m}}{(1 - \tau S_M / S_{zh})^3}, \quad (1.31)$$

де  $C_x$  – коефіцієнт лобового опору тіла,

$S_M$  – площа міделя тіла,

$y$  – відстань між вісями тіла та потоку,

$\tau$  – корегувальний коефіцієнт,

$m$  – показник ступеня,

$k$  – коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкості течії за живим перерізом.

Коефіцієнт  $k$ , залежний від режиму руху вимірюваної рідини, для розвинутого турбулентного потоку має вигляд [23]

$$k = \frac{(2m+1)(m+1)}{2m^2}. \quad (1.32)$$

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 37   |

Коригувальний коефіцієнт  $\tau$  визначається залежно від співвідношення площ міделя тіла, що обтікається, та трубопроводу, де його встановлено  $\tau = f(S_m/S_0)$  [23].

У випадку просторового обтікання циліндра у напрямі, перпендикулярному його твірній, величина  $C_x$  визначається співвідношенням діаметру і висоти циліндра (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Значення коефіцієнтів  $C_x$ ,  $\tau$

|       | Коефіцієнт лобового опору |      |      |      |      |          | $\tau$ |
|-------|---------------------------|------|------|------|------|----------|--------|
| $D/l$ | 1,0                       | 2,0  | 5,0  | 10   | 40   | $\infty$ | 1,0    |
| $C_x$ | 0,63                      | 0,69 | 0,74 | 0,82 | 0,98 | 1,2      |        |

Враховуючи вираз (1.31), коефіцієнт місцевого опору на ділянці між перерізами 2 – 2 та 3 – 3 визначається рівнянням

$$\xi_{23} = k \frac{C_{xk} S_{mK} / S_{zh0}}{(1 - \tau S_{mK} / S_{zh0})^3}.$$

З урахуванням залежності (31), вираз (30) набуває виду:

$$P_3 = \frac{\rho_n \vartheta_{cp2}^2}{2} \left( 1 - \frac{S_{zh2}^2}{S_{zh3}^2} - k \frac{C_{xk} S_{mK} / S_{zh0}}{(1 - \tau S_{mK} / S_{zh0})^3} \frac{S_{zh2}^2}{S_{zh3}^2} \right) + P_2,$$

Ділянка 3-4 аналогічна ділянці 1-2. Для визначення тиску у перерізі маємо

$$P_4 = P_3 - h_l. \quad (1.33)$$

Втрата тиску на перетворювачі витрати визначається різницею тисків у вхідному і вихідному перерізах (рис. 1.17)

$$\Delta P = P_1 - P_4. \quad (1.34)$$

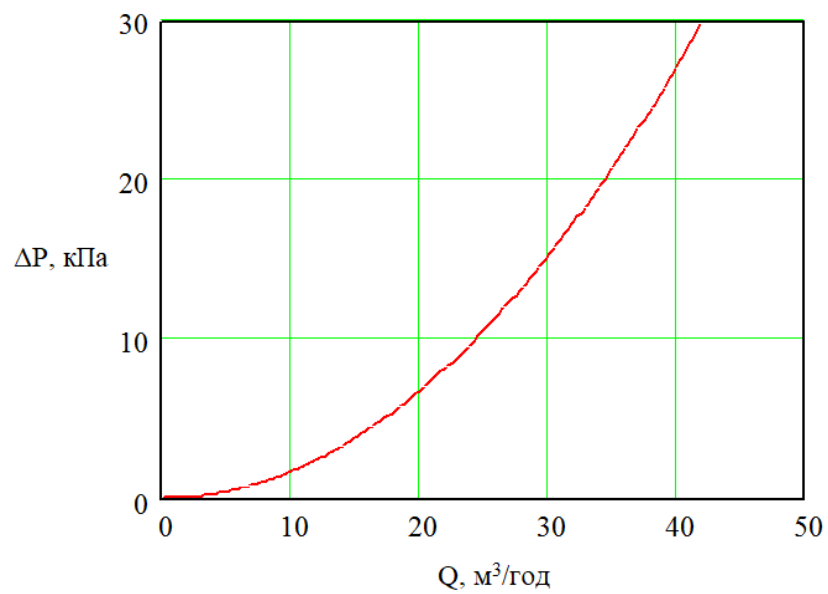


Рисунок 1.17 – Втрата тиску на ВП

## ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1. ОПИС ПРИЛАДУ

Вихровий витратомір призначений для вимірювання об'ємної витрати рідин та газів. Основною конструкцією витратоміра є корпус з тілом обтікання. За тілом обтікання створюється знижений тиск. Поверхневий шар, який обтікає тіло, відривається від тіла і під впливом зниженого тиску з обох його боків почергово виникають зривисті вихори, що створюють пульсації тиску. Чутливим елементом перетворювача є два напівпровідникових термоанометра, які включені в мостову схему, почергові вихроутворення викликають розбалансування моста, на виході якого формується вихідний сигнал, який зазнає перетворень і в кінці отримуємо об'ємну витрату. Витратомір має такі габаритні розміри: ширина 114 мм, довжина 206 мм, висота 254мм (рис. 2.1).

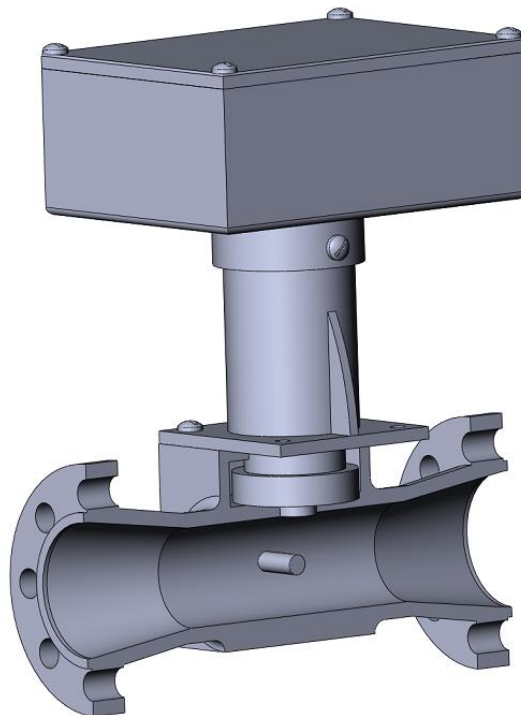


Рисунок 2.1 – Витратомір. 3D модель

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 40   |



## 2. ПОБУДОВА СХЕМИ СКЛАДАЛЬНОГО СКЛАДУ

Упорядкування схеми складального складу (рис. 2.2) є першим етапом на шляху створення технології складання, що показує структурну схему приладу, найменування і число деталей, число складальних одиниць, служить комплектуючою картою при складанні. Проте схема складального складу не дає уявлення про послідовність складання і засоби забезпечення з'єднань. Під поєднанням приладу та процесу монтажу необхідно розуміти правила побудови пристрою з його компонентів та його функціонування та процес складання його деталей. Вся конструкція виробу поділяється на окремі елементи, які групуються в структурні одиниці.

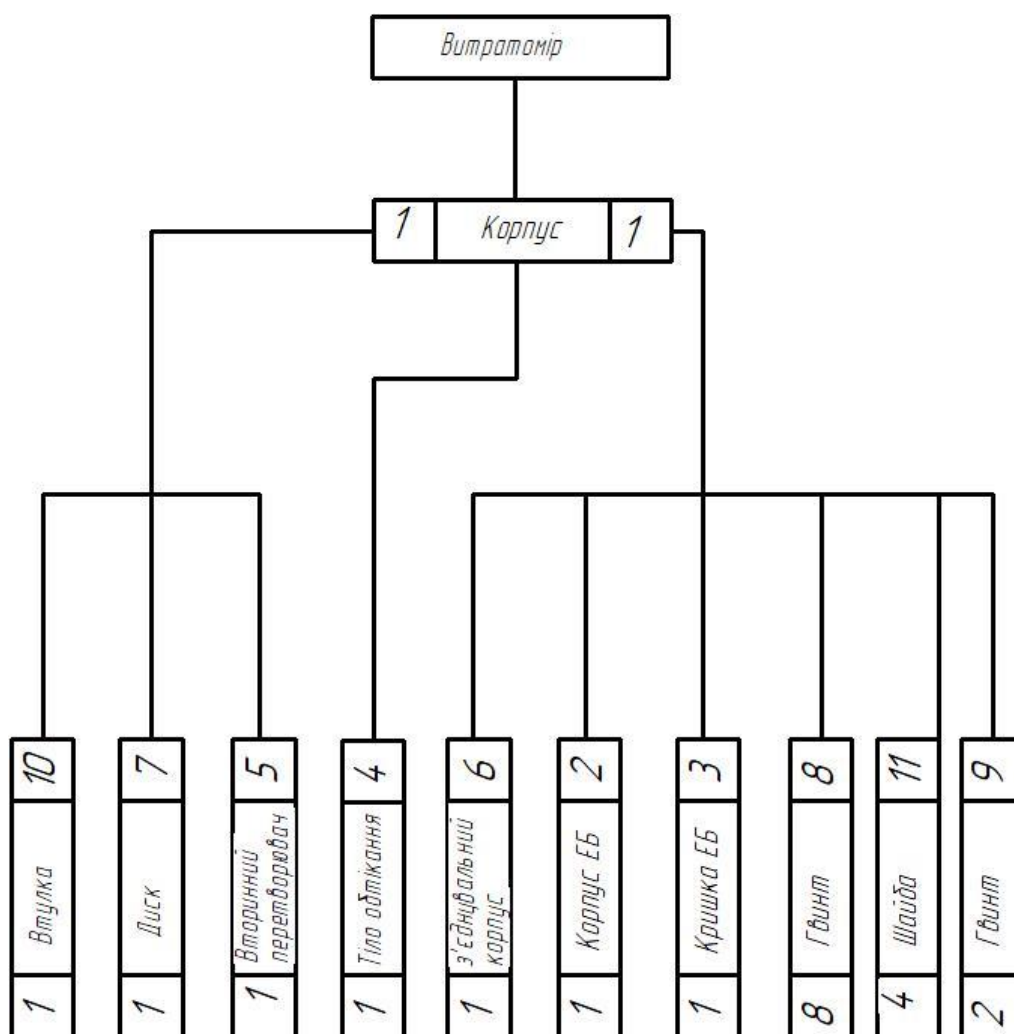


Рисунок 2.2 – Схема складального складу витратоміра

### 3. ПОБУДОВА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ СКЛАДАННЯ

Послідовність складання, засоби забезпечення з'єднань, періодичність та зміст процесів регулювання, випробування та контролю визначає технологічна схема складання (рис. 2.3). Вона являє собою наочне зображення складального процесу і є основним документом, який фіксує технологічний процес складання.

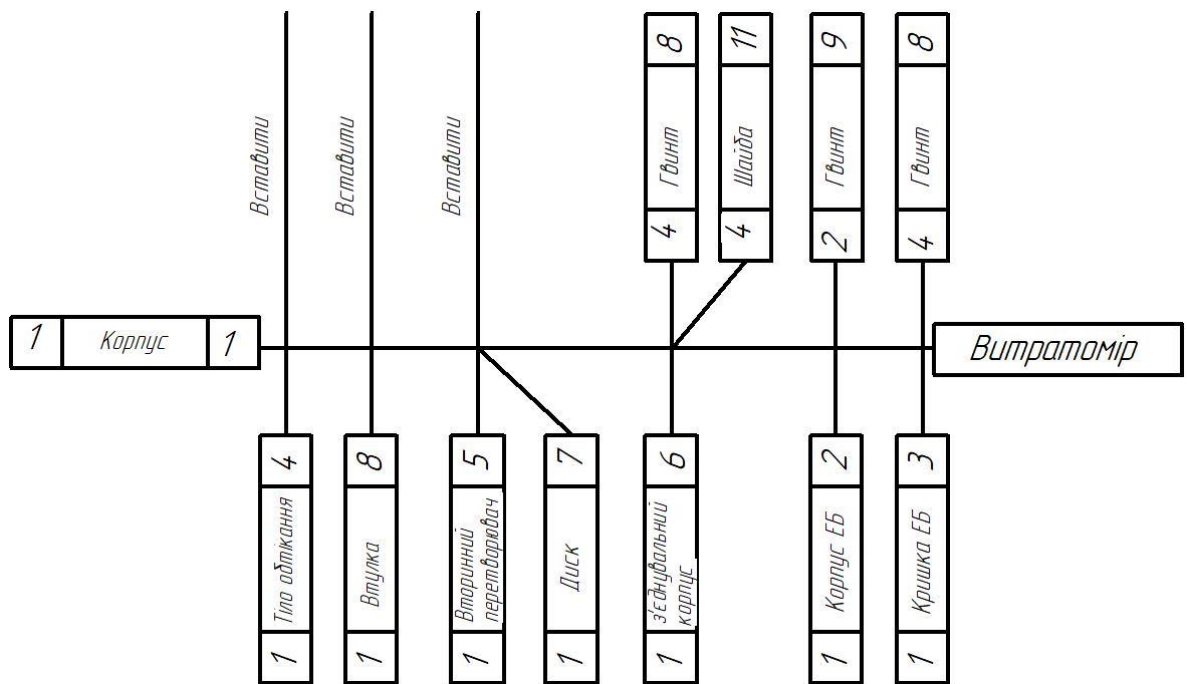


Рисунок 2.3 – Технологічна схема складання витратоміра

#### 4. ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ПРИЛАДУ

В поняття технологічності виробу при складанні входить: простота складання виробу загалом та складальних одиниць без пригонки та доробок, без селективного складання, яка забезпечується економічно доцільними допусками в розмірних, кінематичних та електричних ланцюгах. Технологічними виробами є ті, які забезпечують паралельність складання, можливість диференціації складання, найбільшу уніфікацію та нормалізацію деталей, можливість використання автоматизації процесів складання при найменшій кількості матеріалів та обладнання, що забезпечує скорочення виробничого циклу.

Абсолютний техніко-економічний показник трудомісткості виготовлення  $T_v$  виражається сумою нормо-годин, витрачених на виготовлення виробу

$$T_v = \sum T_i, \quad (2.1)$$

де  $T_i$  – трудомісткість виготовлення та випробувань  $i$ -ї складової частини виробу в нормо-годинах.

Рівень технологічності конструкції по трудомісткості виготовлення  $K_{p.t}$  визначається як відношення досягнутої трудомісткості виробу  $T_v = 37$  н-г до базового показника трудомісткості виготовлення  $T_{б.v} = 41,1$  норм-годин :

$$K_{p.t} = T_v / T_{б.v} = 0,9. \quad (2.2)$$

Попередній розрахунок  $K_{p.t}$  в процесі проектування виробу можна робити по наближеним розрахункам трудомісткості виготовлення основних складових частин, використовуючи дослідно-статистичні дані по виробках-представниках і коригувальні коефіцієнти.

Технологічна собівартість виробу  $C_t$  визначається як сума витрат на одиницю виробу:

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                  | 43   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  |      |

$$C_T = C_M + C_3 + C_{ц.в} = 2150 \text{ грн}, \quad (2.3)$$

де  $C_M = 500$  грн – вартість матеріалів, витрачених на виготовлення виробу,  
 $C_3 = 1500$  грн – заробітна платня виробничих робітників з нарахуваннями,  
 $C_{ц.в} = 150$  грн – цехові витрати, що включають у себе витрати на електроенергію, споживану устаткуванням, на ремонт та амортизацію устаткування, інструмента і пристосувань, на мастильні, охолоджуючі, обтиральні та інші матеріали, передбачені процесом виробництва виробу.

Рівень технологічності конструкції по технологічній собівартості визначається як відношення досягнутої собівартості виробу  $C_T$  до технологічної собівартості базового виробу  $C_{б.т} = 2388$  грн

$$K_{p.c} = C_T / C_{б.т} = 0,9. \quad (2.4)$$

Попередній розрахунок  $K_{p.c}$  в процесі проектування виробу можна робити по наближеним розрахункам технологічної собівартості основних складових частин, використовуючи досвідно-статистичні дані по виробках-представниках та коригувальні коефіцієнти.

В таблицях 2.1 та 2.2 представлено уніфікацію деталей та використовуваних операцій.

Таблиця 2.1 – Уніфікація деталей приладу

| № | Назва деталі   | Кількість деталей | Уніфікація |
|---|----------------|-------------------|------------|
| 1 | Корпус         | 1                 | н/уніф.    |
| 2 | Корпус ЕБ      | 1                 | н/уніф.    |
| 3 | Кришка ЕБ      | 1                 | н/уніф.    |
| 4 | Тіло обтікання | 1                 | н/уніф.    |

Продовження таблиці 2.1

|    |                              |   |         |
|----|------------------------------|---|---------|
| 5  | Вторинний<br>перетворювач    | 1 | н/уніф. |
| 6  | З'єднувальний<br>корпус      | 1 | н/уніф. |
| 7  | Диск                         | 1 | н/уніф. |
| 8  | Гвинт М6х10<br>Гост 17473-80 | 8 | уніф.   |
| 9  | Гвинт М8х12<br>Гост 1491-80  | 2 | уніф.   |
| 10 | Втулка<br>Гост 1978-81       | 1 | уніф.   |
| 11 | Шайба М6<br>ГОСТ 11371       | 4 | уніф.   |

Таблиця 2.2 – Уніфікація використовуваних операцій

| № | Назва операції | Унафікація |
|---|----------------|------------|
| 1 | Встановити     | н/уніф.    |
| 2 | Загвинтити     | уніф.      |

Критерій складності виробу.

$$K_{\text{ск}} = \frac{E}{D} \frac{3}{11} = 0,273, \quad (2.5)$$

де Е – загальна кількість складальних одиниць у виробі, Д – загальна кількість деталей.

Якщо  $K_{\text{ск}} < 0.2$ , то технологічність виробу низька, якщо  $K_{\text{ск}} = 0.2 \dots 0.4$  – задовільна, якщо  $K_{\text{ск}} > 0.4$  – добра. Для заданого приладу (задовільна).

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 45   |

Критерій уніфікації виробу.

$$K_y = \frac{E_y + D_y}{E + D} = \frac{0 + 4}{3 + 11} = 0,29, \quad (2.6)$$

де  $E_y$  – кількість уніфікованих складальних одиниць у виробі,  $D_y$  – кількість уніфікованих деталей.

Якщо  $K_y < 0.25$ , то технологічність виробу низька, якщо  $K_y = 0.25 \dots 0.5$  – задовільна, якщо  $K_y > 0.5$  – добра. Для заданого приладу (задовільна).

Показник уніфікації складальних одиниць.

$$K_{y.c.} = \frac{E_y}{E} = \frac{0}{3} = 0. \quad (2.7)$$

Якщо  $K_{y.c.} < 0.2$ , то технологічність виробу низька, якщо  $K_{y.c.} = 0.2 \dots 0.4$  – задовільна, якщо  $K_{y.c.} > 0.4$  – добра. Для заданого приладу (низька).

Показник уніфікації деталей.

$$K_{y.d.} = \frac{D_y}{D} = \frac{4}{11} = 0,364. \quad (2.8)$$

Якщо  $K_{y.d.} < 0.3$ , то технологічність виробу низька, якщо  $K_{y.d.} = 0.3 \dots 0.6$  – задовільна, якщо  $K_{y.d.} > 0.6$  – добра. Для заданого приладу (задовільна).

Показник уніфікації технологічного процесу.

$$K_{т.п.} = \frac{Q_{т.о.}}{Q_o} = \frac{1}{2} = 0,5, \quad (2.9)$$

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 46   |

де  $Q_{т.п.}$  – число типових технологічних операцій,  $Q_n$  – число всіх необхідних технологічних операцій для складання даного виробу.

Якщо  $K_{т.п.} < 0.5$ , то технологічність виробу низька, якщо  $K_{т.п.} = 0.5 \dots 0.75$  – задовільна, якщо  $K_{т.п.} > 0.75$  – добра. Для заданого приладу (задовільна).

Після проведення аналізу конструкції приладу, обчисливши всі необхідні показники технологічності, робимо висновок, що загальна технологічність виробу, більшості вище розглянутих показників, має задовільну технологічність.

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                  | 47   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  |      |

## 5. РОЗРАХУНОК РОЗМІРНОГО ЛАНЦЮГА

До приладів пред'являються певні вимоги по точності показань або на вихідні параметри за заданих умов експлуатації. При цьому повинна забезпечуватися надійність роботи приладу та необхідний термін його роботи. Всі ці вимоги забезпечуються правильним і обґрунтованим вибором принципової схеми приладу та його конструкції, а також технологією виготовлення деталей і складання приладу. Однією з основних умов технологічності конструкції приладу при виконанні його складання в серійному і масовому виробництві є взаємозамінність складальних одиниць і деталей.

Нехай при складанні витратоміра (рис. 2.4) необхідно забезпечити зазор між вторинним перетворювачем та з'єднувальним корпусом. Ця вимога повинна бути забезпечена в умовах серійного виробництва за рахунок постановки економічно виправданих допусків на деталі витратоміра. Схема розмірного ланцюга показана на рис. 2.5.

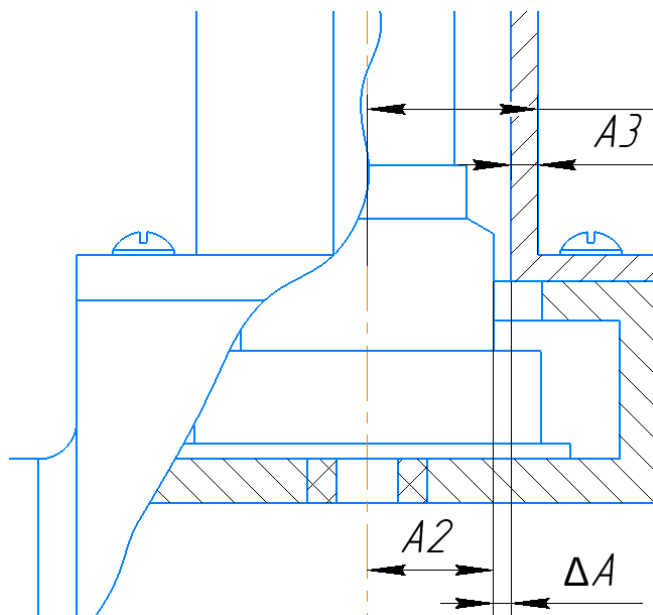


Рисунок 2.4 – Розмірний ланцюг витратоміра



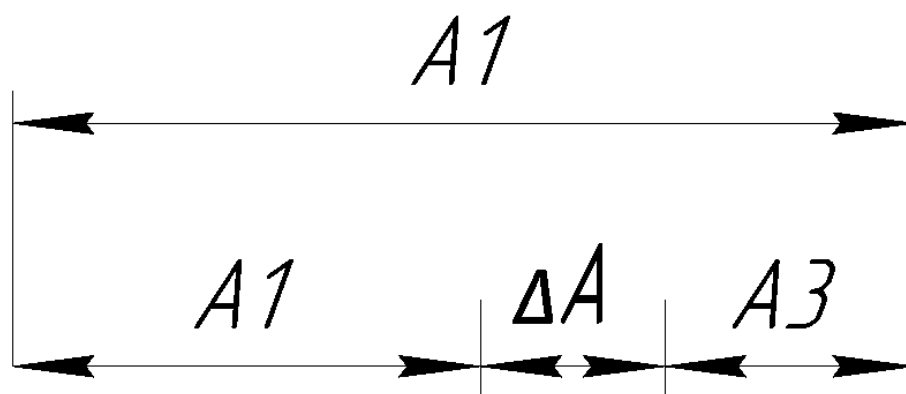


Рисунок 2.5 – Схема розмірного ланцюга

У таблиці 2.3 наведено номінальні значення ланок розмірного ланцюга та їх допустимі відхилення, які взяті з креслення витратоміру.

Таблиця 2.3 – Номінальні значення ланок розмірного ланцюга

| Ланка | Номінальний розмір, мм | Допуск ( $\delta$ ), мм | Координати середини допуску (К), мм | Тип ланки  |
|-------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------|
| A1    | 25                     | -0,021                  | -0,01                               | Збільшуюча |
| A2    | 17                     | +0,018                  | 0,009                               | Зменшуюча  |
| A3    | 5                      | +0,012                  | 0,006                               | Зменшуюча  |

Знайдемо номінальний розмір і допуск замикаючої посадки. Оскільки всі ланки розмірного ланцюга паралельні, то номінальний розмір дорівнює

$$\Delta A = A1 - (A2 + A3) = 25 - 17 - 5 = 3 \text{ (мм)}. \quad (2.10)$$

Допуск на розмір замикаючої ланки дорівнює

$$\delta_{\text{зам}} = \sum_{i=1}^3 |\delta_i| = (0,021 + 0,018 + 0,012) = 0,061 \text{ (мм)}. \quad (2.11)$$

Координата середини поля допуску замикаючої ланки визначається так

$$K_{\text{зам}} = K_1 - (K_2 + K_3) = -0,01 - 0,009 - 0,006 = -0,025. \quad (2.12)$$

Розрахуємо верхнє та нижнє відхилення розміру замикаючої ланки

$$BV_{\text{зам}} = K_{\text{зам}} + 0,5\delta_{\text{зам}} = -0,025 + 0,5 * 0,061 = 0,055 \text{ (мм)}, \quad (2.13)$$

$$NB_{\text{зам}} = K_{\text{зам}} - 0,5\delta_{\text{зам}} = -0,025 - 0,5 * 0,061 = -0,0555 \text{ (мм)}. \quad (2.14)$$

Таким чином, при повній взаємозамінності замикаюча ланка має такий вигляд

$$A_{\text{зам}} = \left( 3 \begin{smallmatrix} +0,055 \\ -0,0555 \end{smallmatrix} \right)_{\text{мм}}. \quad (2.15)$$

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                  | 50   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  |      |

## 6. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ ПРИЛАДУ

Загальні правила розробки технологічного процесу регламентовані ГОСТ 14.301-73.

Проектування технологічного процесу складання включає вибір найбільш раціональних процесів і способів складання, визначення послідовності з'єднання деталей і складальних одиниць, регулювання і контролю виробу та складальних одиниць, вибір необхідного устаткування, робочих і вимірювальних інструментів та нормування операцій технологічного процесу.

Загальні правила розробки технологічного процесу регламентовані ГОСТ 14.301-73.

Аналізуючи об'єкт складання необхідно звернути увагу на наступні особливості:

- ступінь розчленування виробу;
- характер з'єднання окремих деталей.

Необхідність розчленування приладу на окремі складальні одиниці визначається в першу чергу умовами роботи та експлуатації, можливістю виготовлення і з'єднання деталей.

Розчленування виробу на складальні одиниці може проводитися і з технологічних міркувань – кількість складальних одиниць в приладі, визначає можливість скорочення трудомісткості і тривалості (циклу) складання за рахунок створення умов для виконання складальних операцій, розділення процесу складання на паралельні потоки, автоматизації і механізації процесу.

Після такого аналізу приладу проводиться розробка послідовності складання, послідовності і змісту кожної операції, оформлення технологічної документації.

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                  | 51   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  |      |

Проектування технологічного процесу складання складається з наступних етапів: – на основі аналізу конструкторської документації розробляється схема складального складу і технологічна схема складання;

– визначається організаційна форма складання з урахуванням конструктивних особливостей виробу, річної програми випуску умов взаємозамінності тощо;

– виконується вибір методу складання виходячи з вимог взаємозамінності і прийнятою організаційною формою складання; – розробляється технологічний маршрут складання;

– вибирається обладнання робочих місць в відповідності до призначених складальних операцій; – підбирається універсальна та проектується спеціальна технологічна оснастка;

– для виконання складальних операцій підбираються допоміжні матеріали (припій, флюс, клей тощо);

– проводиться нормування та визначається розряд роботи для кожної операції.

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                  | 52   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  |      |

## ВИСНОВКИ

У проєктно-конструкторському розділі проаналізовано методи вимірювання витрати, їх переваги та недоліки, для подальшого дослідження обрано вихровий метод, що використовує вихрові коливання, створювані вимірюваним потоком при обтіканні нерухомого тіла.

Проведено розрахунки метрологічних характеристик витратоміра, а саме статичної характеристики перетворення, похибки вимірювання, перепаду тиску.

У технологічному розділі оцінено технологічність розроблюваного приладу, що виявилася задовільною за показниками уніфікації деталей та використаних складальних операцій.

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 53   |

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вихревые расходомеры. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: [http://knowkip.ucoz.ru/publ/teplotekhnicheskie\\_izmerenija/izmerenie\\_raskhoda/vi\\_khrevye\\_raskhodomery/3-1-0-24](http://knowkip.ucoz.ru/publ/teplotekhnicheskie_izmerenija/izmerenie_raskhoda/vi_khrevye_raskhodomery/3-1-0-24)
2. Расходомеры и счетчики веществ: Справочник: Кн. 1. / Под общ. 54ас . Е. А. Шорникова – 5-е 54ас., перераб. И доп. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.
3. Расходомеры и счетчики веществ: Справочник: Кн. 2. / Под общ. 54ас . Е. А. Шорникова – 5-е 54ас., перераб. И доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
4. Pisarets A. Optimization of turbine type flow rate transducer with hydrodynamic balancing of sensitive element / A. Pisarets, I. Korobko // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2017. – Вип. 54(2). – С. 65 – 71. DOI:10.20535/1970.54(2).2017.119574 ;
5. Коробко І. В. Автоматизація досліджень динамічних характеристик перетворювачів витрати рідиннофазних середовищ / І. В. Коробко, А. В. Писарець, А. С. Місяць // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2018. – Вип. 56(2). – С. 91 – 96. DOI:10.20535/1970.56(2).2018.152457 ;
6. Ivan Korobko, Flow transducers metrological performances optimization with flow bodies at flow asymmetry conditions / Ivan Korobko, Anna Pysarets // Вісник КПІ. Серія приладобудування. – 2019. – Вип. 57(1). – С. 56 – 61. DOI:10.20535/1970.57(1).2019.172024 ;
7. Коробко І. В. Оцінювання метрологічних характеристик витратомірів обтікання та факторів впливу на них / І. В. Коробко, А. В. Писарець, А. М. Рак // Метрологія та прилади. – 2019. – № 6. – С. 27-34. DOI: 10.33955/2307-2180(6)2019.27-34 ;
8. Коробко І. В. Дослідження впливу форми чутливого елемента на динамічні характеристики турбінних перетворювачів витрати / І. В.

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 54   |

Коробко, А. В. Писарець, І. О. Фісунов // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2015. – Вип. 49 (1). – С. 14 – 19. ;

9. Турбінні перетворювачі витрати енергоносіїв з гідродинамічним врівноважуванням чутливого елементу. Монографія / А. В. Писарець, І. В. Коробко. – К.: "Корнійчук", 2013. - 159 с.

10. Кремлевский, П. П.. Расходомеры и счетчики количества : справочник / П. П. Кремлевский. - Ленинград : Машиностроение Ленингр. отд-ние, 1989. - 700, [1] с. : ил. ; 23 см.

11. Коробко И.В. Особенности оптимизации формы чувствительных элементов вихревых измерительных преобразователей 55ас хода жидкофазной среды / И.В. Коробко, В.А. Коваленко // Вестн. Гомельского Государственного технического университета им. П. О. Сухого.– 2013.- №4(55).– С.36–42.

12. Киясбейли А. Ш., Перельштейн М. Е. Вихревые измерительные приборы. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.

13. Писарець А. В. Аналіз сучасного стану вихрових засобів вимірювання кількості речовини // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 2001. – С. 53 – 56.

14. Електромагнітні витратоміри ІВК. [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <http://www.katrless.com.ua/ibk.php?lang=ua>

15. Расходомеры-счетчики ультразвуковые «ДНЕПР-7У». [Електронний ресурс]: – Режим доступу: [file:///E:/4%20%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81/%D0%94%D0%9F/%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B8/dopler\\_portativ\\_re.pdf](file:///E:/4%20%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81/%D0%94%D0%9F/%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B8/dopler_portativ_re.pdf)

16. ОПИСАНИЕ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕЕСТРА. [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <http://www.kip-guide.ru/docs/14663-06.pdf>

17. Расходомер-счетчик вихревой 8800. [Електронний ресурс]: – Режим доступу:

|      |      |          |        |      |                  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП ПМ6111.000.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 55   |

<https://www.emerson.com/documents/automation/%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE-%D0%BF%D0%BE-%D1%8D%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%BB%D1%83%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8-%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80-%D1%81%D1%87%D0%B5%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA-%D0%B2%D0%B8%D1%85%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%B9-8800-rosemount-ru-ru-327304.pdf>

18. Что такое вихревой расходомер?! Характеристики. Виды. Принцип действия. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: [http://www.td-rashodomer.ru/info/articles/vihrevoi\\_rashodomer.htm](http://www.td-rashodomer.ru/info/articles/vihrevoi_rashodomer.htm)

19. Киясбейли, Азиз Шахрияр оглы. Вихревые счетчики-расходомеры / А. Ш. Киясбейли, М. Е. Перельштейн. – Москва : Машиностроение, 1974. – 158 с.

20. Лурье. М. С. Вихревые расходомеры и счетчики количества жидкости с контактно-кондуктометрическим приемником-преобразователем вихревых колебаний. – Красноярск:СибГТУ, 1999. – 196 с.

21. Прозоров М. А. Вихревые счетчики-расходомеры, выпускаемые предприятиями ФПГ «Промприбор». // Приборы и системы управления. 1997. № 5. С. 32 – 35.

22. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. – М: Наука, 1964. – 814 с.

23. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям: / Идельчик И.Е. – М.: Машиностроение, 1975. – 543 с.

24. Рабинович Е.З. Гидравлика. – М.: Недра, 1980 – 278 с.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ДП ПМ6111.000.00</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 56   |



# ДОДАТКИ